

学位論文題名

The Winter Ozone Minimum over the
Subtropical Northwestern Pacific

(冬季亜熱帯太平洋西部のオゾン極小について)

学位論文内容の要旨

地球成層圏の内部には、高さ 20~40 km のところを中心にオゾン(O₃)が比較的多く含まれており、オゾン層と呼ばれている。オゾンは低緯度成層圏で光化学反応によって生成し、高緯度へ輸送されている。上部成層圏では光化学的寿命は日程度と短く、ほぼ光化学平衡であるが、下部成層圏では 100 日程度と長く、輸送がしている。中部成層圏では両方が重要である。

TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 気候値のデータによる、北半球の赤道から 30° N までの低緯度には、冬の 12 月、1 月、2 月にオゾン全量が他の月より少ない。オゾン全量は 1 年を通して赤道付近で少なく、高緯度側が多い。

更に亜熱帯北太平洋西部 (20° N, 140° E を中心として) では冬季に 235 ドブソン単位 (DU) 以下の顕著なオゾン極小が観測され、短い期間 (数日から 1-2 週間) では時々 200 DU 以下の極端に少ない値が観測される。同じようなレベルのオゾン全量は 8 月、9 月、10 月の南極のオゾンホールだけである。このオゾンの極小は冬の 12 月、1 月、2 月だけ発生している、ほかの月には 20N 全域にはほとんど変化がない。オゾン極小を発生する規模は毎年も違うが、多くとも 250DU 以下である。ある年は 220DU 以下になる。TOMS の毎日のデータを調べると、188DU になった日もある。このオゾン極小域については年々変動についてしらべた Zhou et al. (2003) の論文があるが、その生成原因については分かっていたいなかった。

当研究では 9 年平均 (1991-2000 年) の TOMS と HALOE (Halogen Occultation Experiment) の衛星観測データを用いて、まずこの地域のオゾン極小の鉛直構造を調べた。その結果、オゾン極小は主に成層圏に原因があり、10-15 hPa を中心とした中部成層圏と 40-60 hPa を中心とした下部成層圏の 2 つの極小層が見られることが分かった。中部成層圏でも下部成層圏でも亜熱帯北太平洋西部の付近に同緯度よりオゾン混合比が少ないが、その値は全域的な極小ではない。しかし中部成層圏と下部成層圏とたすと亜熱帯北太平洋西部の付近にオゾンの極小が出てきた。

10-15 hPa を中心とした中部成層圏では水平位面に赤道から 40° N までオゾン混合比が減っている事が分かった。つまり、南北流が起こったら、オゾン混合比が変化しやすい。従って、水平流の状況を調べて、10hPa では冬季アリューシャン高気圧のために北風が強いことが分かった。そこで中部成層圏オゾンの少ない層ができるのは、冬季のアリューシャン高気圧に伴った循環により高緯度のオゾンの少ない空気が亜熱帯太平洋域に輸送されるためと考えられる。

更に簡単な二次元光化学輸送モデルを作って、ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) データの水平移流を使って 10hPa のオゾン変化を再現できた。

2001 年 12 月に亜熱帯北西太平洋域で極端に少ないオゾン量が観測された。このケースを那覇 (26° 12' N, 127° 41' E) のオゾンゾンデ観測とモデルで調べた。その結果は 2001 年 12 月のオゾン極小は主に中部成層圏に原因があることが分かった。

backward trajectory を使って 2001 年 12 月 5 日に 10 hPa 那覇付近の空気塊の 8 日前の位置を調べた。8 日前に高緯度の空気塊がアリューシャン高気圧による循環によって沖縄付近に来たことが分かった。

9 年平均の気候場においても 2001 年 12 月のケースにおいても亜熱帯北西太平洋域の冬季のオゾン極小は本質的に力学的原因によって引き起こされていることが示された。

一方、ERA40 (ECMWF 40 年再解析) データを使って 40-60 hPa を中心とした下部成層圏のオゾン変化を調べた。まず太平洋中緯度で東西コントラストが大きかった 1990 年 1 月を選び、backward trajectory を使って、下部成層圏 50hPa の空気の起源を調べた。1990 年 1 月の ECMWF-ERA40 デリデータを使い、毎日太平洋中緯度 50hPa 空気塊の 2 ヶ月前の位置を調べた。

結果として 50hPa 北太平洋域西部の空気塊は約 77% が 50hPa の下から来たことが分かった。一方 50hPa 北太平洋域東部の空気塊は 63% が 50hPa の下から来たことが分かった。下部成層圏での光化学反応時間は長くて、数十日から百日である。そして、下部成層圏のオゾン分布によって、鉛直勾配が大きくて、上から下へ減少している。そこで、北太平洋西部 50hPa でのオゾン濃度少ない原因は同緯度より 50hPa 下から来た空気塊が多くて、その空気塊が薄いオゾンを輸送するためと考えられる

また、40-60 hPa を中心とした下部成層圏ではオゾン変化と QBO と関係もしらべた。1 月赤道域 30hPa-70hPa 東西風が西風シアの時は、東シアより下部成層圏赤道域オゾンが多く 20° N-60° N の中緯度オゾンが少ないことがわかった。しかし、北太平洋西部では QBO による差はあまり有意ではない。これは、中緯度でオゾンが減少する西風シアのときに、太平洋の東西でのコントラストが減少するためであることがわかった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 崎 孝 治
副 査 教 授 長 谷 部 文 雄
副 査 助 教 授 藤 原 正 智
副 査 助 教 授 廣 川 淳
副 査 教 授 塩 谷 雅 人 (京都大学生存圏研究所)

学 位 論 文 題 名

The Winter Ozone Minimum over the Subtropical Northwestern Pacific

(冬季亜熱帯太平洋西部のオゾン極小について)

地球成層圏には高さ 20~40km を中心にオゾン(O_3)が多く含まれる層があり、オゾン層と呼ばれている。オゾンは主に低緯度成層圏で光化学反応によって生成し、高緯度へ輸送されている。上部成層圏ではオゾンの光化学的寿命は 1 日程度と短く、オゾンはほぼ光化学平衡状態にあるが、下部成層圏では光化学的寿命は 100 日程度と長く輸送が卓越している。中部成層圏では光化学反応と輸送の両方が重要である。

TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 気候値のデータによると、(20°N, 140°E) を中心とした亜熱帯北太平洋西部では冬季に 235 ドブソン単位 (DU) 以下の顕著なオゾン極小が観測され、短い期間 (数日から 1-2 週間) では時々 200 DU 以下の極端に少ない値が観測される。同じようなレベルのオゾン全量は春の南極のオゾンホールだけである。このオゾンの極小は冬にだけ発生している、ほかの季節には 20°N 全域にはほとんど変化がない。オゾン極小の規模は年によって違うが、多くとも 250DU 以下である。少ない年は 220DU 以下になる。TOMS の毎日のデータを調べると、188DU になった日もある。このオゾン極小域についての年々変動についてしらべた Zhou et al. (2003) の研究があるが、その生成原因については分かっていなかった。

当研究では 9 年平均 (1991-2000 年) の TOMS と HALOE (Halogen Occultation Experiment) の衛星観測データを用いて、まずこの地域のオゾン極小の鉛直構造を調べた。その結果、オゾン極小は主に成層圏に原因があり、10-15 hPa を中心とした中部成層圏と 40-60 hPa を中心とした下部成層圏の 2 つの層で当該地域のオゾン量は同緯度の他の地域より少ないことが分かった。中部成層圏では赤道域から高緯度に向かいオゾン量は減少し、当該地域はオゾン量の谷となっている。一方、下部成層圏では赤道域から高緯度に向かいオゾン量は増大し、当該地域はやはりオゾン

量の谷となっている。中部・下部成層圏、それぞれでは当該地域のオゾン量は極小ではないが、両方の和は当該地域で極小を示すことがわかった。

10-15 hPa を中心とした中部成層圏は、鉛直方向にはオゾン濃度のピークにあたり、南北方向には赤道から高緯度にゆくに従ってオゾン混合比は減少している。従って、当該地域に北のオゾンの少ない空気が流入することによりオゾンが減少していると考えられる。10hPa では冬季に北太平洋に準定常的に存在するアリューシャン高気圧があり、高緯度のオゾンの少ない空気がその下流域にある当該地域に輸送されるためオゾンが少ないと考えられる。この仮説を検証するため、簡単な二次元光化学輸送モデルを作り、ECMWF(European Centre for Medium Range Weather Forecasts)データの水平風を使い 10hPa のオゾン濃度をシミュレートし、観測をよく再現することができた。

一方、ERA40(ECMWF 40年再解析)データを使って 40-60 hPa を中心とした下部成層圏のオゾン極小の原因を調べた。まず亜熱帯太平洋で東西コントラストが大きかった 1990年1月を選び、後方流跡線解析により、下部成層圏 50hPa の空気の起源を調べた。解析には ECMWF-ERA40 の3次元の風を使い、毎日太平洋中緯度 50hPa 空気塊の3ヶ月前の位置を調べた。50hPa 北太平洋域西部の空気塊は主に熱帯対流圏及び下部成層圏起源の空気が東部に比べて多かった。北太平洋西部 50hPa でオゾン濃度が低い原因はよりオゾンの少ない対流圏や下部成層圏から来た空気塊が多いためと考えられる。

中部・下部成層圏とも光化学的原因ではなく力学的原因によりオゾン濃度が低いことがわかった。

また、40-60 hPa を中心とした下部成層圏におけるオゾン量と準2年振動(Quasi-Biennial Oscillation: QBO)との関係も調べた。1月の赤道域 30hPa-70hPa 東西風が西風シアの時は、東風シアより下部成層圏赤道域オゾンが多く、 20° N- 60° Nの中緯度オゾンが少ない。しかし、北太平洋西部ではQBOによる差はあまり有意ではない。これは、中緯度でオゾンが減少する西風シアのときに、波動の振幅が小さく太平洋の東西でのオゾンのコントラストが減少するためであることがわかった。

冬季亜熱帯北太平洋西部のオゾン極小は力学的要因によるが明らかになったのは当研究の成果である。オゾン減少は紫外線強度の増加をもたらすので、当該地域の海洋生態系への影響もあると思われる今後の研究発展が望まれる。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また申請者が研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、博士(地球環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有すると判断した。